

## МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ В СОСТАВЕ ТНА ЖРД

Д.Н. Галдин

Научный руководитель: профессор, д.т.н. А.В. Кретинин  
Воронежский государственный технический университет  
Россия, г.Воронеж, Московский проспект, 14, 394026  
E-mail: [dmgaldin@yandex.ru](mailto:dmgaldin@yandex.ru)

Существующая на данный момент задача улучшения показателей эффективности центробежных насосов (ЦН) заключается в повышение качества проектирования составных частей, таких как подводящее устройство, рабочее колесо и отвод. Эта задача является общей для всех лопаточных машин, однако особенно актуальна она для насосных агрегатов двигателей летательных аппаратов. Для них, в первую очередь для турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей, необходимо обеспечение минимальных массы и габаритов при максимальной экономичности. При этом необходимо учитывать, что в жидкостном ракетном двигателе, как минимум два насоса, которые могут быть многоступенчатыми, как, например, в двигателе РД0120 [1]. Большое количество проведённых теоретических и экспериментальных исследований показало, что основным элементом, определяющим основные характеристики центробежного насоса, является рабочее колесо, его геометрия существенно влияет на коэффициент полезного действия насоса.

Существующие расчётные методики, используемые для профилирования рабочего колеса ЦН, дают возможность получить достаточно хорошие результаты. К сожалению, данные методики содержат большое количество поправочных коэффициентов, что препятствует получению оптимальных геометрических параметров.

Использование возможностей математического моделирования гидродинамических процессов в проточной части центробежного насоса с применением системы конечно-элементного анализа ANSYS совместно с различными методами нелинейного программирования позволяет получить оптимизированную геометрию проточной части насоса, обеспечивающую максимальную гидродинамическую эффективность [2]. Одной из возможных задач совершенствования проточной части является многокритериальная условная оптимизация, при этом ограничениями являются кавитационный запас и конструктивные параметры, а критерий оптимизации гидравлический КПД насоса (при необходимости могут использоваться другие критерии эффективности).

Для того, чтобы выполнить оптимизацию центробежного насоса, необходимо предварительно создать специальные расчётные модули элементов проточной части (параметрические 3D-модели). Геометрия проточной части центробежного насоса в описываемой методике может состоять из следующих элементов: подводящее и отводящее устройства, рабочее колесо. Под параметризованной 3D моделью принимается совокупность ряда параметров, основных геометрических ограничений и набора алгоритмов моделирования, которые позволяют при изменении в определённых заданных диапазонах значений некоторых параметров автоматически перестроить модель элемента.

С целью формирования корректной модели оптимизации первоначально проводится поверочный расчёт исходной геометрии центробежного насоса. В ходе поверочного расчёта на основе исходных параметрических моделей элементов проточной части строятся сеточные модели. Построение сеточных моделей происходит с помощью модулей Ansys Meshing, Ansys Turbogrid или Ansys ICEM CFD. После того как сеточные модели будут сформированы на их основе создаётся расчётная модель в модуле вычислительной гидродинамики Ansys CFX. С помощью инструмента CFX Pre формируются граничные условия (на входе, выходе, стенках, интерфейсы между сеточными моделями), параметры моделирования (модель турбулентности, зависимости от температуры рабочего тела: плотности, вязкости, давления насыщенных паров и пр.) и передаются в решатель CFX. В решателе задаются параметры алгоритма решения

сеточных уравнений и запускается процесс решения. После сходимости системы сеточных уравнений результаты передаются в CFX Post, где обрабатываются и выводятся в качестве выходных значений критериев оптимизации.

При проведении идентификационного расчёта проводится анализ влияния задаваемых в препроцессоре CFX установок на показатель сходимости результата решения (значения невязок). В ходе расчёта основными параметрами, определяющими успешное моделирование, являются: стационарный или неустановившийся режим течения, используемая модель турбулентности, количество элементов расчетной сетки, задаваемые граничные условия. Решение считается успешным в том случае, если значения всех среднеквадратичных невязок (RMS) ниже  $10^{-4}$ , а интегральные параметры принимают стабильное значение. В результате анализа полученных результатов для достижения оптимального баланса между точностью расчёта и временем необходимого на его выполнения уточнение необходимых параметров расчёта.

После настройки проекта исследования назначаются независимые и зависимые переменные, диапазоны изменения независимых переменных, критерии оптимизации и ограничиваемые параметры. Для одного проекта исследования может быть сформулирована и настроена целая совокупность задач оптимизации, различающихся варьируемыми переменными, критериями и ограничениями. В зависимости от выбранной задачи оптимизации в параметрические 3D модели элементов проточной части центробежного насоса необходимо внести дополнительные коррективы таким образом, чтобы исключить отклонение геометрических размеров за пределы сверх заданных ограничений. Для определения расположения точек проектирования составляется план эксперимента. Основная цель планирования эксперимента — задание точек наиболее эффективным образом, что позволит получить требуемую информацию при наименьшем числе вычислений, а также повысить точность метамодели.

Следующим этапом в описываемой модели оптимизации является выбор подходящего алгоритма построения метамодели или модели регрессионного анализа. Составной частью среды конечно-элементного анализа ANSYS является программный модуль оптимизации DesignXplorer. Технологии, применяемые в данном модуле, позволяют осуществлять управление параметрами для прогнозирования влияния параметрических или геометрических изменений на конструкцию. Учитывая использование апробированных оптимизационных алгоритмов? применение модуля DesignXplorer в качестве базового средства оптимизации элементов центробежных насосов является обоснованным, и представляется целесообразным вследствие универсальности и возможности решения задач широкого спектра.

Основными задачами, решаемыми с помощью данной методики, являются повышение точности, снижение трудоемкости и продолжительности расчета, исключение влияния «человеческого» фактора и общее технологическое совершенствование существующих инженерных методик расчета и оптимизации гидравлических и геометрических параметров проточной части центробежных насосов. На рис.6 изображена структура управления процессом оптимизационного проектирования на предприятии-изготовителе насосных агрегатов.

Разработанная методика может применяться для любых насосных агрегатов, включая насосы турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей как для низко-, так и для высококипящих компонентов топлива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.В. Турбонасосные агрегаты кислородно-водородных ЖРД: монография, А.В. Иванов, А.И. Белоусов, А.И. Дмитренко. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011. 284 с.
2. Валюхов С.Г., Кретинин А.В. Оптимизация геометрии рабочего колеса центробежного нефтяного насоса с использованием инструментов ANSYS // Материалы международной конференции «Воронежская зимняя математическая школа С.Г. Крейна -2014». - Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2014. – С. 76-83